doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.008

玉米播种机播深和压实度综合控制系统设计与试验

白慧娟[1]　方宪法[1,2]　王德成[1]　苑严伟[2]　周利明[2]　牛　康[2]

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083;
2. 中国农业机械化科学研究院土壤植物机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083)

摘要: 提高玉米播深合格率和一致性,并保持适宜的压实度,可以确保种子和土壤的良好接触,从而促进玉米苗期生长,有利于提高产量。本文对播深和压实度控制过程进行了分析,通过实时调节施加在四连杆仿形机构上的液压力调节下压力,实现播深的间接控制,通过实时调节镇压机构处的弹簧伸长量调节镇压力,从而间接控制压实度。从播深和压实度综合控制角度出发,设计了播深和压实度电液控制系统,主要包括测控系统、液压系统和机械部分等。控制系统的阶跃响应测试结果表明:下压力控制系统的调节时间均值为 2.69 s,稳态误差均值为 91.5 N,超调量均值为 22.95%;镇压力控制系统的调节时间均值为 1.44 s,稳态误差均值为 30 N,超调量均值为 1.83%。田间试验表明,当设定播深为 50 mm、目标下压力为 3 000 N、目标镇压力传感器测量值为 400 N、播种机作业速度为 6~10 km/h 时,电液主动调节方式下的播深合格率均值为 91.33%,播深变异系数均值为 8.98%,机械调节方式下的播深合格率均值为 82.67%,播深变异系数均值为 16.73%。基于电液主动调节方式的播种机的试验指标优于基于机械调节方式的指标。

关键词: 玉米播种机; 播深; 下压力; 镇压力; 控制系统

中图分类号: S223.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)09-0061-12　　**OSID**:

Design and Test of Control System for Seeding Depth and Compaction of Corn Precision Planter

BAI Huijuan[1]　FANG Xianfa[1,2]　WANG Decheng[1]　YUAN Yanwei[2]　ZHOU Liming[2]　NIU Kang[2]

(1. *College of Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *The State Key Laboratory of Soil-Plant-Machine System Technology*, *Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract: Keeping appropriate and consistent seeding depth and compaction pressure is beneficial to rapid and consistent seed germination, and finally increases yield. Seeding depth and compaction pressure varies with terrain floating and different field conditions. In order to make the planter adapt to varying field conditions and keep the seeding depth and compaction pressure in the set range, an electro-hydraulic precise control system for seeding depth and compaction pressure was designed, including hydraulic system, controller, downforce sensor, compaction pressure sensor, oil pressure sensor, and A/D signal acquisition modules. The downforce sensor and compaction pressure sensor were used to sense the real-time downforce and compaction pressure. Control signals were sent to hydraulic valves after calculating the differences between set value and actual measured value by controller, then the action direction and pressure of the hydraulic cylinder connected to the planter unit frame were adjusted, therefore the downforce and compaction pressure applied to the planter unit were adjusted. Through bench test, the control process of the system was calibrated. The step response test results of control system showed that the average adjustment time of the downforce control system was 2.69 s, the average steady state error was 91.5 N, and the average overshoot was 22.95%. The adjustment time of the compaction pressure control system was 1.44 s, the stable state error was 30 N and the overshoot was 1.83%. The mechanical spring-regulated seeding unit and electro-hydraulic-regulated seeding unit were installed on a

收稿日期: 2020-05-09　修回日期: 2020-06-29

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700103、2016YFD0200607)

作者简介: 白慧娟(1993—),女,博士生,主要从事玉米精密播种技术研究,E-mail: bhj93@cau.edu.cn

通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化研究,E-mail: fangxf@caams.org.cn

same planter and their performances were obtained and compared though field tests. As for electro-hydraulic-regulated seeding unit, the seeding depth was set to 50 mm, the target value of downforce was set to 3 000 N, and the target value of compaction pressure sensor was set to 400 N. The planter operated at 6 ~ 10 km/h. For the unit under electro-hydraulic active adjustment mode, the seed depth qualification rate was 91.33%, the coefficient of variation (CV) was 8.98%. For the unit under the mechanical adjustment mode, the seed depth qualification rate was 82.67%, and the CV was 16.73%. The test index of the unit based on the electro-hydraulic active adjustment method was better than the index of the unit based on the mechanical spring adjustment method. The research result provided a kind of electro-hydraulic method and system to adjust downforce and compaction pressure actively and accurately, which can finally realize consistent seeding depth and compaction pressure.

Key words: corn planter; seeding depth; downforce; compaction pressure; control system

0 引言

精密播种是提高玉米产量的关键[1],提高玉米的粒距一致性、播深一致性是实现精密播种的具体要求[2]。播深影响玉米出苗时间、出苗率、玉米冠层结构和光合特性,进而影响玉米产量[3-6]。对于特定的土壤环境,保持适宜且一致的播深和压实度,能确保种子和土壤的良好接触,使种子易于从土壤中汲取水分,有利于种子快速出苗且出苗整齐[7-9]。土壤质地变化和地形变化是影响播深变异性的主要因素[10]。目前,在玉米播种机上一般采用单体仿形技术实现精确的仿形,通过下压力控制技术提高播种单体对土壤质地变化的适应性[11]。围绕玉米播深测控,目前主要进行了直接和间接两种测量和控制的研究。在直接测量控制方面,蔡国华等[12]和 WEN 等[13]采用超声波传感器实时检测播深,并设计了控制系统,通过液压系统调节播深。NIELSEN 等[14-16]针对播种机分别设计了基于角度传感器、基于线性位移传感器和超声波传感器的两种播深测量系统和一套电液控制系统,通过对开沟压力的主动调节提高播种机高速作业条件下的播深一致性。赵金辉等[17]设计了基于位移传感器的播深控制系统,通过液压系统调节四连杆仿形机构,进而调节播深,测量的播深稳定性系数大于 90%。在播深间接测量控制方面,黄东岩等[18]设计了一种主动作用式播深自动控制系统,采用 PVDF 压电薄膜传感器测量播种机限深轮的胎面形变量,根据胎面形变量实时监测播种单体对地表的压力,通过安装在四连杆间的空气弹簧调节播种单体对地表的压力,进而调节播深。李玉环等[19]设计了玉米气动式播深控制系统,用压力传感器测量镇压轮的压力,用电动推杆驱动覆土器运动,通过调节覆土量调节播深,播深合格率高于 90%。付卫强等[20]和高原源等[21]均采用销轴传感器测量限深轮对地压力,分别用液压方式和气压方式调节播种单体下压力,文献[20]建立了控制系统输入电压与销轴传感器反馈电压之间的传递函数,采用 PID 算法实现了控制,文献[21]建立了基于限深轮处下压力与气囊压力、四连杆倾角的数学模型,基于此数学模型实现了下压力控制。

以上研究通过控制播深或覆土厚度实现播深控制,并未综合考虑播深和覆土镇压问题,对播种后的镇压力研究较少。玉米生长受播深和覆土镇压的多重影响,鉴于镇压力难以测量、且不能实时控制的问题,本文从系统工程的角度出发,设计一种电液控制系统,对下压力和镇压力进行同步实时控制,间接地控制播深和压实度,从而提高玉米播种的精密化和智能化水平。

1 系统组成与工作原理

1.1 系统组成

播深和压实度综合控制系统的结构框图如图 1 所示,系统主要由测控系统、液压系统及用于播深及压实度控制的机械部分组成。测控系统主要由车载终端、PLC 控制器、下压力传感器、镇压力传感器和油压传感器等组成。其中,PLC 控制器采用 EasyController YW - RT2216,编程平台为 Easybuilder,使用梯形图语言进行编程,配置一个 A/D 信号数据采集卡,采用北京科瑞兴业科技公司的 K8512CAN 总线模拟量采集模块,用于采集镇压力和下压力传感器的输出信号,并通过 CAN 总线发

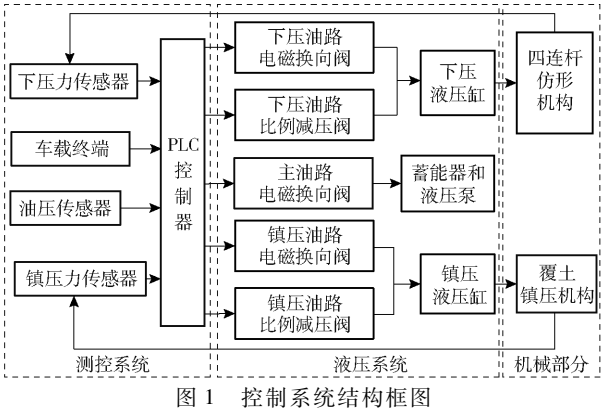


图 1 控制系统结构框图

Fig. 1 Structure diagram of control system

送给车载终端和 PLC 控制器。

液压系统主要由电磁换向阀、比例减压阀、液压缸等组成。液压元件的选型与所需工作压力有关。由于目标下压力与土壤质地、水分条件、地表残留情况、地形、播种机速度等多种因素有关，较难确定适宜下压力值，本文参照俄亥俄州立大学 FULTON 团队关于下压力的农艺研究，在耕整地上播种时，当设定播深为 50 mm，在四连杆仿形机构处施加 450 N 作用力时，播深变异系数较小，为 5.1%[22]，其在农艺试验中采取的最大下压力水平为 1 810 N[23]，考虑到免耕播种环境，本文拟在四连杆仿形机构处施加的目标作用力范围为 600 ~ 2 000 N。选用 SUN Hydraulics 的直动式比例减压阀，其压力调节范围为 0.7 ~ 7.75 MPa，对应电流控制信号为 0 ~ 1 150 mA，综合考虑液压缸的工作压力和伸缩行程，确定液压缸的内径为 32 mm，活塞杆直径为 22 mm，缸筒长度为 250 mm，行程为 150 mm，可以提供的下压力范围为 562 ~ 6 230 N，可以满足本文设计要求。

为了实现播深和压实度的电液自适应调节，需安装各压力传感器和液压缸，对中农机 2BJ - 470B 型玉米免耕精量播种机的播种单体结构进行了部分修改。播种单体结构如图 2 所示，主要由下压力传感器、限深轮、限深块、圆盘开沟器、下压液压缸、镇压轮、镇压力传感器、弹簧、弹簧拉杆、镇压液压缸等组成。由于销轴传感器在检测播种单体下压力中已被多次采用[20-21]，工作可靠，适应性强，因此，被选作下压力传感器和镇压力传感器。

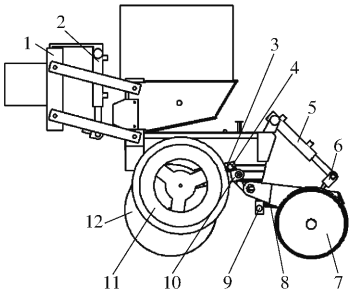


图 2　播种单体结构图

Fig. 2　Structural diagram of planter unit

1. 机架　2. 下压液压缸　3. 限深块　4. 下压力传感器　5. 镇压液压缸　6. 弹簧拉杆　7. 镇压轮　8. 弹簧　9. 镇压力传感器　10. 限深轮拐臂　11. 限深轮　12. 圆盘开沟器

下压力传感器安装方式如图 3 所示。下压力传感器安装在限深块安装座上，限深块带孔，铰接在下压力传感器上，限深块外壁与限深块安装座孔的内壁之间留有适当空隙 δ，限深轮拐臂对限深块施加作用力，随之限深块对下压力传感器产生作用力，从而下压力传感器测得限深轮拐臂与限深块之间的作用力，即下压力。

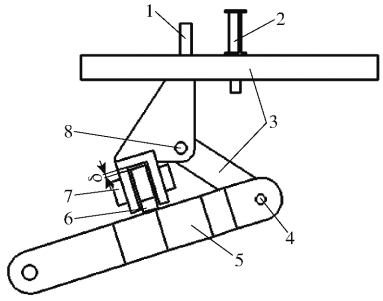


图 3　下压力传感器安装示意图

Fig. 3　Installation diagram of downforce sensor

1. 限深块安装座　2. 播深调节手柄　3. 机架　4. 转轴Ⅰ　5. 限深轮拐臂　6. 限深块　7. 下压力传感器　8. 转轴Ⅱ

镇压液压缸和镇压力传感器的安装方式如图 4 所示。镇压液压缸安装在机架和弹簧拉杆之间，镇压力传感器安装在机架上，弹簧一端与镇压力传感器挂接，另一端与弹簧拉杆挂接，在镇压液压缸作用下，弹簧拉杆可绕其与镇压轮架的铰接点转动，带动弹簧伸缩，从而镇压力传感器测得弹簧力，根据弹簧力与镇压力之间的关系，镇压力传感器可以间接测得镇压力。

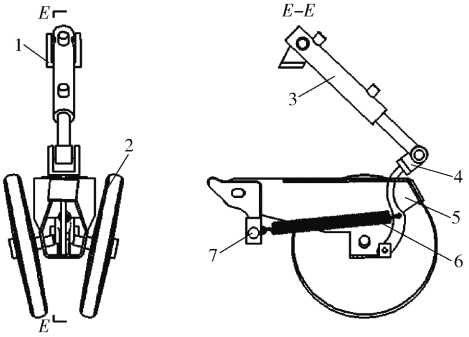


图 4　镇压力传感器安装示意图

Fig. 4　Installation diagram of compaction pressure sensor

1. 机架　2. 镇压轮　3. 镇压液压缸　4. 弹簧拉杆　5. 镇压轮架　6. 弹簧　7. 镇压力传感器

1.2　工作原理

系统工作时，通过车载终端设定目标下压力和目标镇压力传感器测量值，下压力传感器、镇压力传感器及油压传感器将实测值传给 PLC 控制器，计算实测值与目标值之差，基于控制算法计算出新的控制量，传给液压阀组中的相应阀。其中，主油路电磁换向阀主要调节主油路的工作状态，即由液压泵直接供油或由蓄能器供油；下压油路电磁换向阀和下压油路比例减压阀主要调节下压液压缸的动作和出口压力，进而调节四连杆仿形机构的动作；镇压油路电磁换向阀和镇压油路比例减压阀主要调节镇压液压缸的动作和压力，进而调节覆土镇压机构的动作。当各实测值在设定阈值范围内时，表明播深和压实度达到设定要求，控制量保持不变。因此，该系统通过控制下压力和镇压力，间接地实现了播深和压实

度的闭环控制。

2 播深及压实度控制过程分析

图 5 为播种单体整体受力分析图,可用于问题的阐述和后续分析,图中状态Ⅰ指限深块与限深轮拐臂未接触,状态Ⅱ指限深块与限深轮拐臂接触。

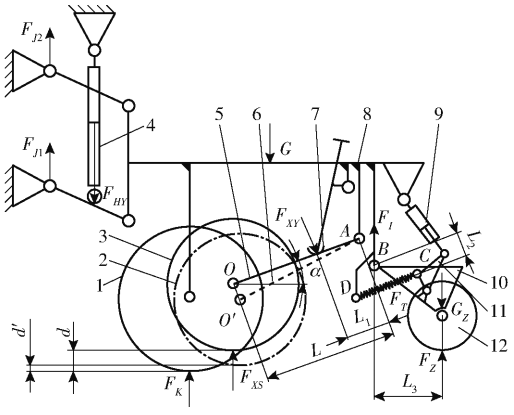


图 5 播种单体整体受力示意图

Fig. 5 Schematic of overall planter unit force

1. 圆盘开沟器 2. 播种单体处于状态Ⅰ时的限深轮 3. 播种单体处于状态Ⅱ时的限深轮 4. 下压液压缸 5. 播种单体处于状态Ⅱ时的限深轮拐臂 6. 播种单体处于状态Ⅰ时的限深轮拐臂 7. 限深块 8. 机架 9. 镇压液压缸 10. 镇压轮架 11. 弹簧拉杆 12. 镇压轮

2.1 播深控制过程

作业前通过调节限深块的位置设定播深,播深一旦设定,限深块的位置则相对机架固定。作业过程中,限深轮下边缘与地表接触,圆盘开沟器的下边缘决定种沟底部的位置,因此,两者下边缘高度之差即实际播深[24]。当限深轮拐臂与限深块接触时,播深为 d,此时,播深达到设定值;当限深轮拐臂与限深块脱离接触时,播深为 d',此时,播深小于设定值,如图 5 所示。

传统播种单体在四连杆仿形机构的上下杆之间安装机械弹簧,用于调节下压力。在作业前调整好弹簧两端位置,作业过程中难以根据下压力变化实时调节弹簧伸长量,从而不能精确调整对平行四杆的作用力,易造成播种单体下压力不足、限深轮拐臂与限深块脱离接触的情况发生,从而导致播深合格率低且播深不一致。本文用下压液压缸代替机械弹簧,旨在获得实时可调的作用力,最终实现合格且一致的播深。对播种单体总体进行受力分析,研究导致下压力变化进而引起播深变化的具体原因及控制方法。

把平行四杆和播种单体整体作为研究对象进行受力分析,当竖直方向上受力平衡时,有关系式

$$F_Y = F_J + F_K + F_{XS} + F_Z - G - F_{HY} \tag{1}$$

式中 F_Y——播种单体竖直方向所受合力,N

F_J——F_{J1}与 F_{J2}之和,F_{J1}、F_{J2}为机架对播种单体竖直方向的牵引力,N

F_K——圆盘开沟器竖直方向开沟阻力,N

F_{XS}——土壤对限深轮支持力,定义为限深力,N

F_Z——土壤对镇压轮作用力,N

G——播种单体重力,N

F_{HY}——下压液压缸对四连杆仿形机构竖直方向的液压力,N

假设播种单体在竖直方向上的初速度为 0,且播种单体处于状态Ⅱ。当竖直方向合力为 0 时,播种单体在此方向上受力平衡,其运动状态不变;当合力大于 0 时,播种单体将产生竖直向上的加速度,从而产生竖直向上的速度,播种单体将向上运动,导致播种单体转为状态Ⅰ;当合力小于 0 时,播种单体将产生竖直向下的加速度,从而产生竖直向下的速度,播种单体将向下运动,使限深轮拐臂与限深块进一步接触,竖直方向上的柔性接触发生形变。因此,只有合力不大于 0 时,才可以获得合格的播深。

在作业过程中,设初始状态时合力为 0,牵引力 F_J、重力 G 可视为常量,而地形特征、土壤质地等外在因素的变化不可避免地会引起开沟阻力 F_K、限深力 F_{XS}及 F_Z的变化。为了使合力不大于 0,需使液压力 F_{HY}随着 F_K、F_{XS}、F_Z合力的变化做相应变化。因此,本文的播深控制方法是通过自适应地调节下压液压缸提供的液压力,确保作业过程中,播种单体在竖直方向上所受的合力方向始终竖直向下,从而使限深轮拐臂与限深块保持稳定接触状态,实现合格且一致的播深。

图 5 中,F_{XY}表示限深块对限深轮拐臂的作用力,是下压力传感器检测到的力,本文中定义此力为下压力。当下压力大于 0 时,代表播深达到目标值,因此,下压力可以反映实时播深,与播深控制有关。限深力 F_{XS}是土壤对限深轮的支持力,决定种沟侧壁的紧实度,其目标值与作业环境、水分条件、地形等多种因素有关,较难确定。为明确限深力与下压力之间的关系,参照图 5,以限深轮和限深轮拐臂为研究对象,进行受力分析,得到

$$M_A(F) = F_{XY}L_1 - F_{XS}L\cos\alpha \tag{2}$$

式中 $M_A(F)$——合力对 A 点的转矩,N·m

L_1——F_{XY}的作用点与 A 点的距离,m

L——限深轮轴心与 A 点的距离,m

α——限深轮拐臂 OA 与水平面夹角,(°)

当 $M_A(F)=0$ 时,力矩平衡,此时

$$F_{XS}=\frac{L_1}{L\cos\alpha}F_{XY} \tag{3}$$

当播种单体工作在某一工位时，α 为定值，限深力与下压力呈线性关系。因此，当知道适宜的目标限深力时，可以计算出对应的下压力，进而可通过对下压力的控制，实现对播深和种沟侧壁紧实度的同步控制。

2.2　压实度控制过程

压实度主要由镇压轮对播后土壤的作用力决定，此作用力即镇压力。对于传统播种单体，镇压轮通过镇压轮架与机架铰接，并用弹簧连接机架与镇压轮，镇压轮在绕铰接点转动的同时又受到弹簧的拉力，弹簧在镇压轮上的位置固定，作业过程中，由于地表的浮动，镇压轮会绕着铰接点转动，弹簧则随之伸缩，镇压力实时变化，将导致压实度偏大或偏小。本文通过镇压液压缸自适应地调节弹簧长度，使弹簧力实时可调，间接地使镇压力保持稳定，最终获得适宜且一致的压实度。

为明确弹簧力与镇压力的关系，对镇压轮处机构进行受力分析。以镇压轮架和镇压轮为研究对象进行受力分析，可得

$$M_B(F)=(F_Z-G_Z)L_3-F_TL_2 \tag{4}$$

式中　$M_B(F)$——合力对 B 点的转矩，N·m

G_Z——镇压轮重力，N

L_3——B 点与镇压轮轴心水平距离，m

F_T——弹簧力，即镇压力传感器测量值，N

L_2——B 点与弹簧中心线 DC 距离，m

当 $M_B(F)=0$ 时，力矩平衡，此时

$$F_Z=\frac{L_2}{L_3}F_T+G_Z \tag{5}$$

F_Z为镇压力的反作用力，因此，镇压力与镇压力传感器测量值之间呈线性关系。

3　控制系统设计

3.1　车载终端界面设计

车载终端采用 IEI Ikarp 型车载计算机，采用 Labwindows CVI2012 软件环境进行车载终端软件开发，界面如图 6 所示。软件采用模块化设计，主要功能包括播种施肥电驱控制、种肥监测、播深及压实度自动控制等。本文主要通过车载终端设置目标下压力和目标镇压力，同时显示下压力与镇压力实测值。设定的目标值通过 CAN 总线接口发送至 PLC 控制器。

3.2　控制程序设计

程序由主程序、主油路工作状态控制子程序、下压力控制子程序和镇压力控制子程序组成，主程序实现对子程序的调用，流程图如图 7 所示。

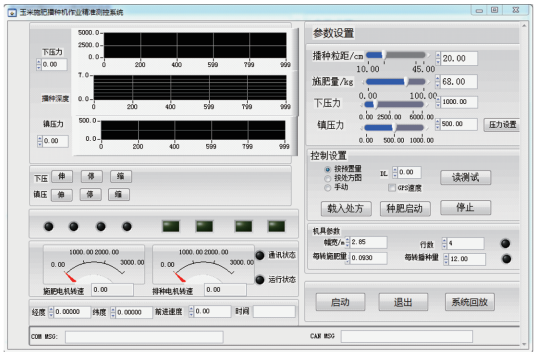


图 6　车载终端软件界面

Fig. 6　Software interface of vehicle terminal

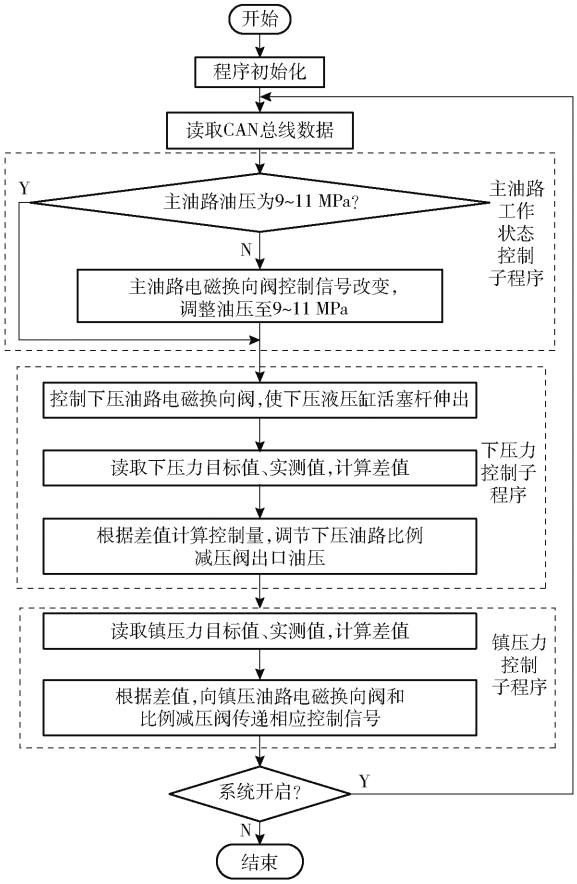


图 7　程序流程图

Fig. 7　Program flow chart

主油路工作状态控制子程序通过控制主油路电磁换向阀实现主油路在两种工作状态间切换，状态 1 是液压泵为主油路和蓄能器供油，状态 2 是蓄能器为主油路供油，而压力油经主油路电磁换向阀直接返回油箱。通过两种状态的切换，使液压泵间断地为主油路供油，减少油液发热，确保油压位于 9 ~ 11 MPa 区间即可。通过油压传感器检测主油路油压，当其位于 9 ~ 11 MPa 区间时，保持主油路电磁换向阀当前控制信号不变；当油压小于 9 MPa 时，主油路处于状态 2，改变主油路电磁换向阀信号，使主油路由状态 2 变为状态 1；当油压大于 11 MPa 时，主油

路处于状态 1,此时改变主油路电磁换向阀控制信号,使主油路由状态 1 变为状态 2。

下压力控制子程序通过直接控制下压液压缸对四连杆仿形机构的作用力,间接控制下压力。在程序执行过程中,通过控制下压油路电磁换向阀,确保下压液压缸活塞杆在整个下压力控制过程中,均处于伸出状态;通过控制下压油路比例减压阀出口油压,实现下压液压缸对四连杆仿形机构作用力的控制,具体方法是读取下压力目标值、实测值并计算两者差值,根据控制算法,计算差值对应的控制量变化量,与当前控制量相加,得到新的控制量,赋给下压油路比例减压阀,调节其出口油压,循环此过程,实现下压力的控制。

镇压力控制子程序通过镇压液压缸直接控制弹簧力,间接控制镇压力。在程序执行过程中,主要通过控制镇压油路电磁换向阀,控制镇压液压缸活塞杆带动弹簧伸缩和静止,同时通过控制镇压油路比例减压阀,控制镇压液压缸对弹簧的拉力。具体方法是读取镇压力传感器目标值、实测值并计算两者差值,当差值大于设定阈值且实测值大于目标值时,控制镇压油路电磁换向阀,使镇压液压缸活塞杆收回,此时镇压油路比例减压阀电流为 0,弹簧收缩;当差值位于设定阈值范围内时,控制镇压油路电磁换向阀使液压缸活塞杆保持不动,此时镇压油路比例减压阀电流为 0,使弹簧长度保持不变;当差值大于设定阈值且实测值小于目标值时,控制镇压油路电磁换向阀使液压缸活塞杆伸出,通过标定得到此时镇压油路比例减压阀电流为 500 mA,可以使液压缸以合适的速度拉动弹簧,循环此过程,实现镇压力的控制。

4 试验与结果分析

4.1 下压力与镇压力标定试验

4.1.1 试验台搭建

本文主要通过控制电流信号来控制比例减压阀的出口压力,达到调节下压力和镇压力的目的。为了得到控制电流信号和下压力、镇压力之间的关系,需要分别进行试验标定。因此,设计了如图 8 所示的限深轮支撑架,搭建了如图 9 所示的下压力标定试验台和如图 10 所示的镇压力标定试验台。在进行下压力和镇压力标定试验前,为了使电子秤便于放置在限深轮和镇压轮下,均需通过拖拉机的升降阀组将播种单体整体升至适当位置。

不同设定播深下,同样压力作用下得到的下压力不同[25]。玉米适宜播深一般为 50 mm,在此设定播深下进行下压力标定试验。首先将限深轮支撑架



图 8 限深轮支撑架实物图

Fig. 8 Physical figure of support frame of depth-limiting wheel

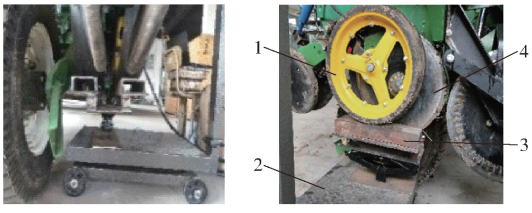


图 9 下压力标定试验台

Fig. 9 Downforce calibration test bench

1. 限深轮 2. 电子秤 3. 限深轮支撑架 4. 圆盘开沟器



图 10 镇压力标定试验台

Fig. 10 Calibration test bench of compaction pressure

置于 TCS－750 型带轮可折叠电子秤(量程为 0 ~ 750 kg,精度为 100 g)上,然后利用支撑架的两个支撑面分别支撑两侧限深轮,使圆盘开沟器处于两个支撑台中间的空隙处悬空,升起限深轮支撑架,使限深轮缓慢上升,使平行四杆下杆和限位块的下边缘脱离接触,如图 11 所示,当下压力从 0 变为较小的正值时,限深轮停止上升,此时,给电磁换向阀信号,使液压缸活塞杆伸出,播种单体下降,从而使播种单



图 11 标定时平行四杆位置

Fig. 11 Position of four parallel bars during calibration test

1. 平行四杆上杆 2. 限位块 3. 平行四杆下杆

体和限深轮支撑架质量全部施加在电子秤上，之后开始标定试验。

镇压力标定时，将电子秤置于镇压轮下，通过整体升降阀组，使播种单体缓慢下降，当镇压轮与电子秤刚接触、电子秤开始显示数值时，使播种单体停止下降，为降低单体自重对镇压力数据的影响，对电子秤进行去皮操作，之后开始标定试验。

试验中，限深轮支架与电子秤之间的作用力为限深力，镇压轮与电子秤之间的作用力为镇压力，通过电子秤显示限深力和镇压力，通过油压表显示下压油路比例减压阀和镇压油路比例减压阀的出口油压，通过车载终端显示下压力、镇压力传感器测量值，在试验过程中实时记录数据。

4.1.2　下压力标定试验

静态试验中，由于下压力和限深力主要受下压液压缸对四连杆机构的作用力影响，下压液压缸产生的作用力由比例减压阀出口油压决定，出口油压与控制电流呈正相关，因此，下压力和限深力主要受控制电流影响。以电流为试验因素，在 0 ~ 1 150 mA 中，等间距选取 24 个水平，以下压力、限深力为试验指标，先后进行电流递增和电流递减过程的单因素试验，每组试验重复 3 次，取平均值，用于建立下压力和限深力与控制电流之间的关系模型。试验数据如表 1 所示。

(1)下压力与限深力之间的关系

对于电流递增和递减两个过程，分别提取下压力和限深力数据，利用 Excel 绘制散点图，用线性模型进行拟合，得到限深力与下压力之间的关系式

$$z' = 0.523\,1y' - 66.737 \tag{6}$$

$$z'' = 0.504\,6y'' - 1.264\,8 \tag{7}$$

式中　z'——电流递增过程中的限深力，N

y'——电流递增过程中的下压力，N

z''——电流递减过程中的限深力，N

y''——电流递减过程中的下压力，N

式(6)和式(7)的决定系数 R^2 分别为 0.975 5 和 0.991 5，均接近 1，说明拟合的可信度较高，由于回归系数分别为 0.523 1 和 0.504 6，相差不大，为了便于控制，计算两个过程中同一电流信号对应的下压力平均值和限深力平均值，用线性模型对两者之间的关系进行拟合，得到关系式

$$z = 0.512y - 27.085 \tag{8}$$

式中　z——限深力，N

y——下压力，N

式(8)的决定系数 R^2 为 0.990 7，拟合可信度较高，以此式作为限深力和下压力之间的关系模型。当得知目标限深力时，可通过此模型计算出对应的目标下压力，本文主要通过对下压力的控制，实现播深和限深力的控制。

表 1　下压力和限深力试验数据

Tab.1　Experiment data of downforce and depth-limiting force

编号	电流/mA	电流递增过程		电流递减过程	
		下压力/N	限深力/N	下压力/N	限深力/N
1	0	1 470	700	2 298	1 149
2	50	1 499	610	2 254	1 130
3	100	1 587	680	2 567	1 200
4	150	1 708	780	2 623	1 328
5	200	1 830	890	2 679	1 338
6	250	1 858	850	2 747	1 373
7	300	1 886	800	2 816	1 489
8	350	2 579	1 340	3 154	1 636
9	400	2 840	1 460	3 492	1 698
10	450	2 872	1 500	3 459	1 744
11	500	3 124	1 730	3 426	1 726
12	550	3 385	1 860	3 884	2 100
13	600	3 624	1 970	4 342	2 203
14	650	3 913	2 150	4 336	2 200
15	700	3 995	2 140	4 330	2 197
16	750	4 320	2 330	4 691	2 385
17	800	4 358	2 180	5 053	2 450
18	850	4 827	2 610	5 103	2 450
19	900	4 864	2 540	5 153	2 630
20	950	5 094	2 400	5 383	2 745
21	1 000	5 179	2 470	5 468	2 810
22	1 050	5 485	2 600	5 685	2 869
23	1 100	5 617	2 820	5 797	2 876
24	1 150	5 740	2 860	5 755	2 939

(2)下压力变化量与电流变化量的关系

对于电流递增和递减两个过程，分别提取电流和下压力数据，做散点图，用线性模型进行拟合，得到下压力与电流信号之间的关系式

$$y' = 4.110\,8x' + 1\,121.9 \tag{9}$$

$$y'' = 3.404\,7x'' + 2\,062.9 \tag{10}$$

式中　x'——电流递增过程中电流，mA

x''——电流递减过程中电流，mA

式(9)、(10)决定系数 R^2 分别为 0.988 0、0.983 2，均接近 1，说明用线性模型进行拟合有较高的可信度。以上公式基于台架试验得到，其中下压力受到单体重力和电流信号的影响，由于单体重力在标定前已全部施加在系统上，且整个过程为常量，因此，电流信号是此过程中唯一引起下压力变化的因素，从而由式(9)、(10)可以推导出电流变化量与下压力变化量的关系。

取电流递增过程中的任意两个数据点 (x'_1, y'_1)、(x'_2, y'_2)，和电流递减过程中的任意两个数据点 $(x''_1,$

y_1'')、(x_2'',y_2''),假设 $x_2' > x_1'$,$x_2'' > x_1''$,则有

$$y_1' = 4.1108x_1' + 1121.9 \quad (11)$$

$$y_2' = 4.1108x_2' + 1121.9 \quad (12)$$

$$y_1'' = 3.4047x_1'' + 2062.9 \quad (13)$$

$$y_2'' = 3.4047x_2'' + 2062.9 \quad (14)$$

$y_2' - y_1' = 4.1108(x_2' - x_1')$,令 $y_2' - y_1' = \Delta y$,$x_2' - x_1' = \Delta x$,则有

$$\Delta y = 4.1108\Delta x \quad (15)$$

式中 Δy——电流递增过程中下压力变化量,N

Δx——电流递增过程中电流变化量,mA

因此,式(15)即为电流递增过程中,下压力变化量与电流变化量的关系方程。

同理,令 $y_2'' - y_1'' = \Delta y'$,$x_2'' - x_1'' = \Delta x'$,可得电流递减过程中,下压力变化量与电流变化量的关系式

$$\Delta y' = 3.4047\Delta x' \quad (16)$$

式中 $\Delta x'$——电流递减过程中电流变化量,mA

$\Delta y'$——电流递减过程中下压力变化量,N

在下压力调节过程中,控制系统计算下压力实测值与目标值之差,差值即控制系统的目标下压力变化量,为实现目标下压力变化量,则给当前的控制量一个变化量,即电流变化量。式(15)、(16)两边分别除以 4.1108 和 3.4047,可得

$$\Delta x = 0.2432\Delta y \quad (17)$$

$$\Delta x' = 0.2937\Delta y' \quad (18)$$

式(17)、(18)分别为电流递增和递减过程中电流变化量与下压力变化量的关系方程,用于两个过程中控制量变化量的计算。控制量变化量与系统当前的控制量相加,即可得到新的控制量。

4.1.3 镇压力标定试验

在试验过程中发现,当给镇压油路比例减压阀电流信号为 450 mA 时,减压阀出口压力为 1.5 MPa,镇压液压缸活塞杆无法拉动弹簧,当电流信号大于 500 mA 时,比例减压阀出口油压大于 1.9 MPa,液压缸可以使弹簧伸长至最大量。当镇压液压缸活塞杆处于伸出状态时,调节镇压油路比例减压阀的电流信号,不能灵敏地调节弹簧伸长量。对于镇压力控制,需要采用一种能灵活控制镇压液压缸动作的方式,本文通过控制镇压油路电磁换向阀来控制镇压液压缸活塞杆的动作,当控制液压缸伸出时,向比例减压阀输入 500 mA 电流信号,避免液压缸伸出速度太快,当控制液压缸收缩和停止时,向比例减压阀输入电流信号为 0,使减压阀出口压力减为零。

另外,为了标定镇压力传感器测量值和镇压力实测值的关系,通过编写程序,控制车载终端界面的“伸”、“停”、“缩”按钮,使镇压液压缸进行相应的动作,控制弹簧伸长量,通过多组试验,得到镇压力传感器测量值和镇压力电子秤实测值并用线性模型进行拟合,得到关系式

$$u = 0.7012v + 51.614 \quad (19)$$

式中 u——镇压力实测值,N

v——镇压力传感器测量值,N

式(19)决定系数 R^2 为 0.9426,可信度较高。此模型可以用于实际作业时,设定一个合适的镇压力传感器目标值。

4.2 阶跃响应试验

4.2.1 下压力控制系统阶跃响应试验

在试验台上进行该试验,由于播种单体所受竖直向下的合力为液压力与重力之和,液压力范围为 562 ~ 6 230 N,重力约为 700 N,因此,竖直向下的合力范围为 1 262 ~ 6 930 N。播种单体所受竖直向上的合力为限深力和机器牵引力在竖直方向上的分力之和,由于牵引力很小,因此,限深力为主要作用力,可估算出限深力范围为 1 262 ~ 6 930 N。根据标定的限深力与下压力的关系可知,理想情况下,下压力范围为 2 518 ~ 13 588 N。在阶跃响应试验中,考虑实际情况,同时避免试验台物理损坏,分别设定目标下压力为 5 000、4 000、3 000、2 500 N,对控制系统进行阶跃响应测试,响应曲线如图 12 所示。

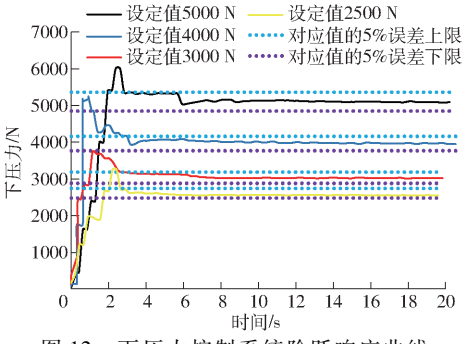


图 12 下压力控制系统阶跃响应曲线

Fig. 12 Step response curves of downforce control system

表 2 为下压力控制系统的阶跃响应测试结果,结果显示,当设定值在 2 500 ~ 5 000 N 之间时,稳态误差均不大于 161 N,调节时间最大为 2.84 s,超调量为 16.40% ~ 26.30%。在此需要说明,尽管在台架上进行阶跃响应试验时目标下压力最小为 2 500 N,但在田间作业环境下,沿竖直向上方向上,除限深力外,播种单体将存在开沟阻力和土壤对镇压轮的支持力,且开沟阻力为主要作用力,因此,对于相同的合力,限深力比重减小,从而可以达到较小的下压力,可以满足四连杆仿形机构处最小作用力为 600 N 的农艺要求。本文取设定值为 5 000、4 000、3 000、2 500 N 时相关试验指标的均值来表征系统的控制性能,得到超调量均值为 22.95%,稳态误差均值为 91.5 N,调节时间均值为 2.69 s。

表 2　下压力控制系统阶跃响应测试结果

Tab.2　Step response test results of downforce control system

试验编号	目标下压力/N	稳态值/N	超调量/%	稳态误差/N	调节时间/s
1	5 000	5 105	16.40	105	2.71
2	4 000	4 161	25.90	161	2.84
3	3 000	3 033	23.20	33	2.57
4	2 500	2 567	26.30	67	2.64
均值			22.95	91.5	2.69

4.2.2　镇压力控制系统阶跃响应试验

分别设定镇压力传感器目标值为 300、250、200 N，进行镇压力控制系统的阶跃响应试验。响应曲线如图 13 所示，响应测试结果如表 3 所示。

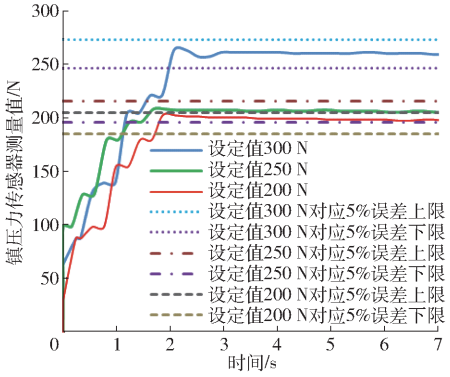


图 13　镇压力控制系统阶跃响应曲线

Fig. 13　Step response curves of compaction pressure control system

表 3　镇压力控制系统阶跃响应测试结果

Tab.3　Step response test results of compaction pressure control system

试验编号	目标值/N	稳态值/N	超调量/%	稳态误差/N	调节时间/s
1	300	260	1.10	40	2.07
2	250	205	1.40	45	0.81
3	200	196	3.00	4	1.44
均值			1.83	30	1.44

由表 3 可知，镇压力控制系统调节时间最长为 2.07 s，稳态误差最大为 45 N，超调量为 1.10% ~ 3.00%。本文取镇压力传感器设定值为 300、250、200 N 时相关试验指标的均值来表征系统的控制性能，得到超调量均值为 1.83%，稳态误差均值为 30 N，调节时间均值为 1.44 s，可以满足一般控制系统的控制精度要求。

4.3　田间试验

4.3.1　试验条件

为了检验控制系统在不同作业速度下的播深控制性能，并与传统机械播种单体的性能进行对比，于 2019 年 9 月在山东省青岛市即墨区姜家庄村盛发农机合作社进行了田间试验。试验地块长 180 m，宽 30 m，地况为刚收完夏玉米的免耕地，地表残茬清晰可见，采用浙江托普云农公司 TJSD－750－Ⅱ型紧实度测量仪测得地表 5 cm 下的土壤紧实度为 50 N/cm^2。本文系统是基于中农机 2BJ－470B 型 4 行玉米免耕精量播种机的一行播种单体设计，进行了安装和调试，与原播种机的一行机械播种单体的调节性能进行了对比试验。

按照该地区的农艺要求，试验前通过播深调节手柄将两种调节方式下的两行播种单体的播深均调节为 50 mm。将试验地块分为 3 个小区，分别采用 6、8、10 km/h 的速度进行试验，在拖拉机上安装北斗卫星测速模块，驾驶员可根据车载终端显示的实测车速对车速进行调控，使各试验组的速度分别保持在 5 ~ 7 km/h、7 ~ 9 km/h、9 ~ 11 km/h 范围内。

在拖拉机开动前，通过车载终端将电液调节方式对应播种单体的目标下压力和目标镇压力传感器测量值分别设定为 3 000、400 N。根据用户手册，调整机械调节播种单体的工作参数。

田间试验如图 14 所示，序号 4、1 对应的单体为田间试验所用单体，另一行电液调节单体采用了不同的液压方案，未进行本次试验。图 15 为作业过程中的下压液压缸和镇压液压缸，图 16 为播种后的地表。为了消除加减速过程对播深的影响，在距离地头两端 30 m 的中间区域选点测量，每隔 4 个理论种距选一测量点，如图 17 所示，测量时，先用一块平板标记地表，用另一块平板逐层刮去地表土壤，待漏出种粒时测量种粒与地表的距离，每组测量 50 个种距。

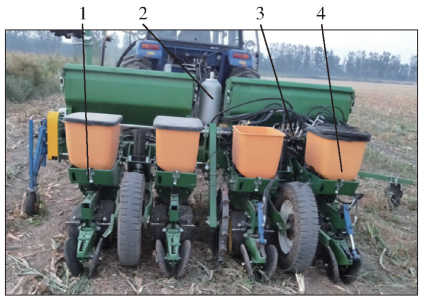


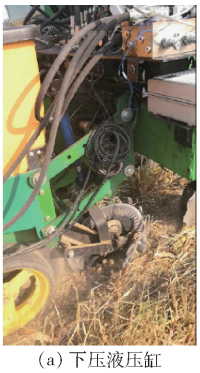
图 14　田间试验

Fig. 14　Field test

1. 试验用机械播种单体　2. 蓄能器　3. 液压阀组　4. 试验用电液调节播种单体

4.3.2　试验指标

根据 NY/T 1768—2009《免耕播种机 质量评价技术规范》及文献[20－21]中的方法进行平均播深、播深合格率、播深变异系数、播深标准差的计算，根据标准中合格播深为 $h \pm 10$ mm 的判定标准，本试验合格播深设定为 40 ~ 60 mm。


(a) 下压液压缸

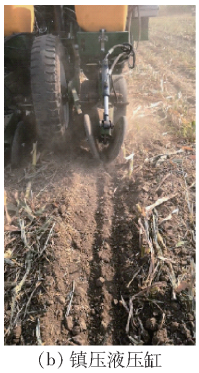

(b) 镇压液压缸

图 15 作业过程中的机具

Fig. 15 Machines during operation



图 16 播种后的地表

Fig. 16 Ground surface after seeding



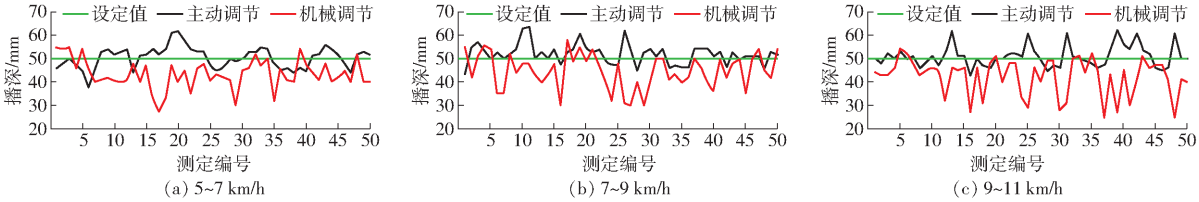
图 17 播深测量

Fig. 17 Measurement of seeding depth

4.3.3 试验结果与分析

图 18 为 3 种速度水平、2 种下压力调节方式下的播深测量数据。可以看出,主动调节方式下的播深在设定值处小范围上下浮动,存在少数播深大于 60 mm,导致播深不合格现象。3 种速度下,机械调节方式下的播深明显小于主动调节方式下的播深,且大部分播深小于设定值,部分播深小于 40 mm,导致播深不合格现象。

对测得的播深数据进行处理,结果如表 4 所示。从表 4 可以看出,电液主动调节方式下播深平均值最大误差为 1.98 mm,播深值略大于设定值,而机械调节方式下最大误差为 7.76 mm,播深明显小于设定值。播深合格率数据显示,随着速度的提升,机械调节方式下的播深合格率降低幅度较大,由 88.00% 降至 78.00%,而电液主动调节方式下的播深合格率降低幅度较小。分析播深标准差和播深变异系数可知,随着速度的增加,机械调节方式下的播深标准差最大为 7.94 mm,变异系数最大为 18.80%,即播深一致性降低,而电液主动调节方式下的播深标准差和播深变异系数变化不明显,播深一致性受速度影响较小,这体现了电液主动调节方式的优势。



(a) 5~7 km/h (b) 7~9 km/h (c) 9~11 km/h

图 18 不同速度和压力调节方式下的播深变化曲线

Fig. 18 Changing curves of seeding depth under different speed and force adjusting way

表 4 播深测量结果

Tab. 4 Test results of seeding depth

试验指标	调节方式	作业速度/(km·h⁻¹)		
		5~7	7~9	9~11
播深平均值/mm	主动	50.48	51.98	50.92
	机械	43.48	44.68	42.24
播深合格率/%	主动	94.00	92.00	88.00
	机械	88.00	82.00	78.00
播深标准差/mm	主动	4.63	4.42	4.72
	机械	6.35	7.50	7.94
播深变异系数/%	主动	9.17	8.50	9.27
	机械	14.60	16.79	18.80

本试验所在地区比较干旱,免耕地块紧实度较高,采用机械调节方式的播种单体下压力不足,一方面无法使播深达到设定值,另一方面也引起作业过程中机器振动较大,导致播深一致性较低。然而,电液主动调节方式可以根据土壤情况调节下压力和镇压力,一方面确保开沟器的入土深度,另一方面保证合适的压实度。此外,足够的下压力减小了播种单体的振动,提升了播深一致性。本试验中,电液主动调节方式下的播深合格率均值为 91.33%,播深变异系数均值为 8.98%,机械调节方式下的播深合格率均值为 82.67%,播深变异系数均值为 16.73%。基于电液主动调节方式的播种机试验指标优于基于机械调节方式的指标。

5 结论

(1)设计了播深和压实度综合控制系统,通过

下压力和镇压力的闭环控制，间接实现了播深和压实度的闭环控制。阶跃响应测试结果表明：下压力控制系统的调节时间均值为 2.69 s，稳态误差均值为 91.5 N，超调量均值为 22.95%；镇压力控制系统的调节时间均值为 1.44 s，稳态误差均值为 30 N，超调量均值为 1.83%，满足作业需求。

（2）田间试验表明，在 6 ~ 10 km/h 的作业速度下，电液主动调节方式对于播深具有稳定可靠的控制性能，播深合格率均值为 91.33%，高于机械调节方式下的 82.67%。且随着播种速度的提升，电液主动调节方式下的播深一致性相对稳定，播深变异系数均值为 8.98%，最大值为 9.27%，而机械调节方式下的播深变异系数均值为 16.73%，最大值高达 18.80%。

（3）在旱作免耕及高速作业条件下，电液主动调节方式可以为播种单体提供足够的下压力和适当的镇压力，能保持较高的播深合格率和播深一致性，整体性能优于机械调节方式。电液主动调节方式为旱作免耕条件下的高速精密播种提供了技术支撑。

参 考 文 献

[1] 杨丽，颜丙新，张东兴，等. 玉米精密播种技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(11)：38 - 48.
YANG Li, YAN Bingxin, ZHANG Dongxing, et al. Research progress on precision planting technology of maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 38 - 48. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20161106&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.11.006. (in Chinese)

[2] 苑严伟，白慧娟，方宪法，等. 玉米播种与测控技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(9)：1 - 18.
YUAN Yanwei, BAI Huijuan, FANG Xianfa, et al. Research progress on maize seeding and its measurement and control technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 1 - 18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180901&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.09.001. (in Chinese)

[3] 吴海燕，崔彦宏，孙昌凤. 不同类型玉米杂交种播深与出苗相关性的研究[J]. 玉米科学，2011，19(2)：109 - 113.
WU Haiyan, CUI Yanhong, SUN Changfeng. Study on relations of sowing depth and seedling emergence of different types of maize seeds [J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(2): 109 - 113. (in Chinese)

[4] 岳丽杰，文涛，杨勤，等. 不同播深对玉米出苗的影响[J]. 玉米科学，2012，20(5)：88 - 93.
YUE Lijie, WEN Tao, YANG Qin, et al. Effects of different sowing depths on seeding emergence of maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(5): 88 - 93. (in Chinese)

[5] 曹慧英，史建国，朱昆仑，等. 播深对夏玉米冠层结构及光合特性的影响[J]. 玉米科学，2016，24(1)：102 - 109.
CAO Huiying, SHI Jianguo, ZHU Kunlun, et al. Effects of sowing depth on canopy structure and photosynthetic characteristics of summer maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(1): 102 - 109. (in Chinese)

[6] KARAYEL D, OZMERZI A. Effect of tillage methods on sowing uniformity of maize [J]. Canadian Biosystems Engineering, 2002, 44: 2 - 23.

[7] PONCET A M, FULTON J P, MCDONALD T P, et al. Effect of heterogeneous field conditions on corn seeding depth accuracy and uniformity [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(5): 819 - 830.

[8] HÅKANSSON I, ARVIDSSON J, KELLER T, et al. Effects of seedbed properties on crop emergence: 1. Temporal effects of temperature and sowing depth in seedbeds with favourable properties [J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Plant Soil Science, 2011, 61(5): 458 - 468.

[9] KNAPPENBERGER T, KOLLER K. Spatial assessment of the correlation of seeding depth with emergence and yield of corn [J]. Precision Agriculture, 2012, 13: 163 - 180.

[10] BADUA S A, SHARDA A, FLIPPO D, et al. Real-time gauge wheel load variability of a row-crop planter during field operation [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 61(5): 1517 - 1527.

[11] PONCET A M, FULTON J P, MCDONALD T P, et al. Corn emergence and yield response to row-unit depth and downforce for varying field conditions [J]. Applied Engineering in Agriculture, 2019, 35(3): 399 - 408.

[12] 蔡国华，李慧，李洪文，等. 基于 ATmega128 单片机的播深自控系统试验台的设计[J]. 农业工程学报，2011，27(10)：11 - 16.
CAI Guohua, LI Hui, LI Hongwen, et al. Design of test-bed for automatic depth of furrow opening control system based on ATmega128 single chip microcomputer[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 11 - 16. (in Chinese)

[13] WEN L, FAN X, LIU Z, et al. The design and development of the precision planter sowing depth control system [J]. Sensors & Transducers, 2014, 162(1): 53 - 58.

[14] NIELSEN S K, NØRREMARK M, GREEN O. Sensor and control for consistent seed drill coulter depth [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 127: 690 - 698.

[15] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill instrumentation for spatial coulter depth measurements[J].

Computers and Electronics in Agriculture, 2017, 141: 207 - 214.

[16] NIELSEN S K, MUNKHOLM L J, LAMANDÉ M, et al. Seed drill depth control system for precision seeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 144: 174 - 180.

[17] 赵金辉,刘立晶,杨学军,等. 播种机播深控制系统的设计与室内试验[J]. 农业工程学报,2015,31(6):35 - 41.
ZHAO Jinhui, LIU Lijing, YANG Xuejun, et al. Design and laboratory test of control system for depth of furrow opening [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6):35 - 41. (in Chinese)

[18] 黄东岩,朱龙图,贾洪雷,等. 基于压电薄膜的免耕播种机播深控制系统[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(4):1 - 8.
HUANG Dongyan, ZHU Longtu, JIA Honglei, et al. Automatic control system of seeding depth based on piezoelectric film for no-till planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(4): 1 - 8. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20150401&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.001. (in Chinese)

[19] 李玉环,孟鹏祥,耿端阳,等. 玉米播深智能控制系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):62 - 68.
LI Yuhuan, MENG Pengxiang, GENG Duanyang, et al. Intelligent system for adjusting and controlling corn seeding depth[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 62 - 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s010&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.010. (in Chinese)

[20] 付卫强,董建军,梅鹤波,等. 玉米播种单体下压力控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6):68 - 77.
FU Weiqiang, DONG Jianjun, MEI Hebo, et al. Design and test of maize seeding unit downforce control system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(6): 68 - 77. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180608&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.008. (in Chinese)

[21] 高原源,王秀,杨硕,等. 播种机气动式下压力控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):19 - 29,83.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Design and test of pneumatic downforce control system for planting [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 19 - 29, 83. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190702&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.002. (in Chinese)

[22] Planter downforce information [EB/OL]. [2020 - 4 - 26]. https://digitalag.osu.edu/precision-ag/research-focuses/precision-seeding.

[23] FULTON J P, PONCET A, MCDONALD T, et al. Considerations for site-specific implementation of active downforce and seeding depth technologies on row-crop planters[C]// Proceedings of the 73rd Conference LAND, TECHNIK-AgEng, 2015, 2251: 139 - 145.

[24] 高原源,王秀,杨硕,等. 基于 CAN 总线的播种深度监测评价系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(12):23 - 32.
GAO Yuanyuan, WANG Xiu, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based sowing depth monitoring and evaluation system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 23 - 32. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20191203&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.12.003. (in Chinese)

[25] 高原源,翟长远,杨硕,等. 精密播种机下压力和播深 CAN 总线监控与评价系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):15 - 28.
GAO Yuanyuan, ZHAI Changyuan, YANG Shuo, et al. Development of CAN-based downforce and sowing depth monitoring and evaluation system for precision planter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 15 - 28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200602&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.002. (in Chinese)